

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ
з курсу**

«ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ»

*(для студентів 3,4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання
за напрямом підготовки 6.050701– "Електротехніка та електротехнології",
а також для слухачів другої вищої освіти
за спеціальністю "Електротехнічні системи електроспоживання")*

Харків
ХНАМГ
2013

Методичні вказівки до виконання курсової роботи курсу «Перехідні процеси в електроенергетиці» (для студентів 3,4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 "Електротехніка та електротехнології", а також для слухачів другої вищої освіти за спеціальністю "Електротехнічні системи електроспоживання") / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: М. Ф. Піскульов, С. В. Швець – Х.: ХНАМГ, 2013 - 27 с.

Укладачі: ст. викл. М. Ф. Піскульов,
доц., к.т.н., доц. С. В. Швець

Рецензент: к.т.н., доц. Хітров А.В.

Рекомендовано кафедрою "Електропостачання міст",
протокол засідання № 3 від 24 листопада 2011 р.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ.....	4
1. Завдання курсової роботи.....	4
1.1. Вихідні дані.....	4
1.2. Текст завдання.....	8
2. Вимоги до пояснювальної записки.....	8
3. Аналіз статичної стійкості.....	9
3.1. Розрахунок параметрів елементів схеми заміщення.....	9
3.2. Розрахунок і побудова кутових характеристик потужності, визначення меж переданої активної потужності та коефіцієнтів запасу статичної стійкості без обліку навантаження.....	10
3.2.1. Нерегульований генератор.....	10
3.2.2. Генератори постачені АРЗ пропорційної дії.....	12
3.2.3. Генератори постачені АРЗ сильної дії.....	13
3.2.4. Розрахунок і побудова кутових характеристик потужності, визначення меж переданої активної потужності та коефіцієнт запасу статичної стійкості з урахуванням навантаження при наявності у всіх генераторів АРЗ пропорційної дії.....	14
4. Аналіз динамічної стійкості.....	16
4.1. Розрахунок і побудова кутових характеристик потужності нормального режиму й при відключеному ланцюзі ЛЕП, визначення максимального кута відхилення ротора генератора..	17
4.2. Розрахунок і побудова кутових характеристик потужності нормального, аварійного та післяаварійного режимів при різних видах короткого замикання на початку ЛЕП, визначення граничних кутів відключення.....	18
4.3. Визначення граничного часу відключення для кожного виду короткого замикання або максимального кута відхилення ротора генератора, у випадку, якщо електропередача стійка в аварійному режимі.....	20
4.4. Проаналізувати вплив на динамічну стійкість заходів режимного характеру.....	22
4.4.1. Аналіз впливу на динамічну стійкість автоматичного повторного включення (АПВ).....	22
4.4.2. Аналіз впливу на динамічну стійкість аварійного розвантаження турбіни.....	24
Список джерел.....	26
Додаток.....	27

ВСТУП

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу "Перехідні процеси в електроенергетиці" призначені для студентів 3, 4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 "Електротехніка та електротехнології", а також для слухачів другої вищої освіти за спеціальністю "Електротехнічні системи електроспоживання".

Метою методичних вказівок є визначення вимог до оформлення пояснювальної записки, виклад порядку виконання курсової роботи, представлення студентам необхідної довідкової інформації та методичної допомоги.

Задача курсової роботи складається в закріпленні знань студентів по основних розділах курсу "Перехідні процеси в електроенергетиці", придбанні практичних навичок у застосуванні теорії до аналізу статичної і динамічної стійкості паралельної роботи генераторів з електричною системою.

Докладний список літератури, наведений у методичних вказівках, дозволить студентам поглиблювати і розширювати здобуті знання, плідно використовувати час, призначений для самостійної роботи.

Методичні вказівки ухвалено:

Кафедрою електропостачання міст. (протокол № 3 від 24 листопада 2011 р.).

Вченою радою факультету електропостачання та освітлення міст. (протокол № 6 від 17 лютого 2011 р.).

1. ЗАВДАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

1.1. ВИХІДНІ ДАНІ

Курсова робота виконується відповідно до індивідуального варіанта вихідних даних, що задає кожному студенту викладач. Вихідні дані по варіантах наведені в таблиці 1.1.

Залежно від варіанта на електричній станції (ЕС) можуть бути встановлені турбогенератори (ТГ) однакової або різної потужності. Генератори потужністю до 60 МВТ включаються за схемою ТЕЦ (рис.1.1), а понад 60 МВТ - за блоковою схемою КЕС (рис.1.2). Якщо генератори різної потужності, то вони включаються за змішаною схемою (рис. 1.3).

Електрична потужність станції передається в систему нескінченної потужності по двохцепній лінії електропередач (ЛЕП). Питомий індуктивний опір $X_{уд}$ ЛЕП до 220 кВ включно приймається рівним 0,4 Ом/км, а понад 220 кВ – 0,33 Ом/км. Тип реактора для всіх варіантів приймається РБ 10-1000-0,28У3 з наступними параметрами: $U_n=10$ кВ, $X_n=0,28$ Ом, $I_{дл.доп}=1$ кА.

Таблиця 1.1

№ варіанта	Кількість і потужність ТГ, МВА	Лінія		Навантаження		Система	
		L , км	U_H , кВ	α , %	$\cos\varphi_H$	U_o , кВ	$\cos\varphi_o$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2×258,3	220	220	20	0,85	310	0,87
2	1×137,5 2×40	110	110	50	0,9	220	0,9
3	2×40 2×25	130	110	30	0,87	220	0,85
4	1×247 2×235,3	170	220	40	0,89	315	0,86
5	1×78,75 1×125	140	110	50	0,9	320	0,87
6	1×78,75 2×40	120	110	40	0,85	315	0,8
7	1×588 2×247	220	330	30	0,87	480	0,85
8	1×375 1×588	270	330	20	0,8	740	0,8
9	3×125 1×78,75	240	330	10	0,9	490	0,86
10	2×25 2×78,75	120	110	50	0,8	210	0,9
11	2×247 2×137,5	290	330	20	0,85	470	0,87
12	2×247 2×258,3	280	330	20	0,87	500	0,85
13	1×353 2×40	200	220	20	0,9	310	0,8
14	1×137,5 2×78,75	210	220	10	0,89	300	0,86
15	2×125 1×588	280	330	10	0,8	500	0,85
16	2×40 1×78,75	120	110	25	0,85	220	0,9
17	1×247 1×353	250	220	30	0,87	500	0,8
18	1×137,5 2×40	145	110	45	0,8	230	0,87
19	2×258,3 2×40	230	220	25	0,9	330	0,86
20	2×247 1×235,3	210	220	40	0,8	320	0,8
21	3×40 1×25	140	110	20	0,87	230	0,83

Продовження табл. 1.1.

1	2	3	4	5	6	7	8
22	2×137,5 1×258,3	225	220	25	0,85	320	0,87
23	2×78,75 2×125	210	220	10	0,87	320	0,85
24	2×78,75 1×40	140	110	35	0,89	310	0,86
25	1×588 1×247	250	330	20	0,9	490	0,8
26	1×375 1×588	240	330	40	0,85	750	0,83
27	2×125 1×78,75	270	330	15	0,8	490	0,9
28	2×125 2×78,75	240	220	30	0,87	330	0,87
29	1×247 2×137,5	270	330	30	0,8	490	0,85
30	1×40 2×78,75	130	110	45	0,89	220	0,86
31	2×353 2×40	180	220	40	0,9	320	0,8
32	1×137,5 2×25	100	110	35	0,8	220	0,9
33	1×125 2×588	250	330	40	0,85	490	0,87
34	2×247 2×258,3	270	330	20	0,87	500	0,85

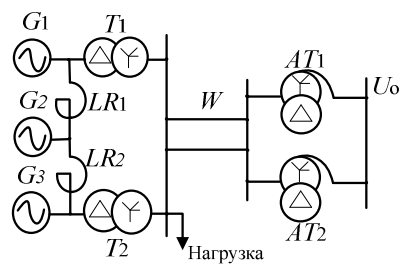


Рис. 1.1. Розрахункова схема ТЕЦ

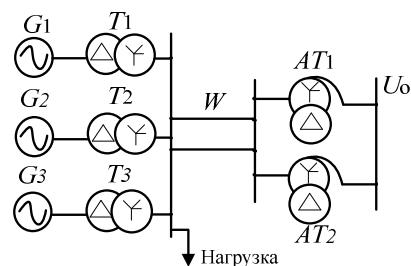


Рис. 1.2. Розрахункова схема КЕС

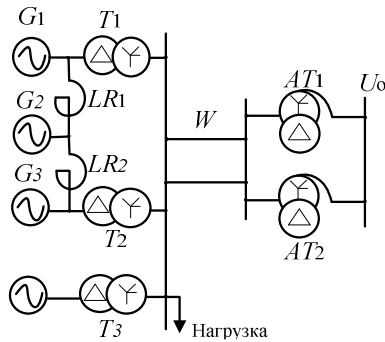


Рис. 1.3. Розрахункова схема з генераторами різної потужності

Відсутні параметри елементів розрахункової схеми, необхідні для визначення параметрів схеми заміщення, студент вибирає самостійно з відповідних таблиць, наведених у додатку.

По таблиці Д1 відповідно до заданої потужності ТГ вибирають його тип і інші параметри, які заносять у таблицю 1.2.

Таблиця 1.2

Тип генератора	S_n , МВА	$\cos\varphi_n$	U_n , кВ	X_d , в.о.	X'_d , в.о.	J , $T \times M^2 \times 0,25$

По таблиці Д2 вибирають тип блокового трансформатора для КЕС або трансформатора зв'язку для ТЕЦ і інші параметри, які заносять у таблицю 1.3.

Таблиця 1.3

Тип трансформатора	S_n , МВ А	U_{nn} , кВ	U_{nv} , кВ	U_k , %

Потужність кожного блокового трансформатора повинна бути не менше повної потужності одного генератора. На ТЕЦ встановлюються два однакових трансформатори сумарною потужністю не менше повної потужності всіх генераторів. Напряга нижчої обмотки трансформатора U_{nn} повинне відповідати номінальній напрузі генератора, а напруга вищої обмотки U_{nv} не повинне перевищувати напругу ЛЕП більш ніж в 1,1 рази.

По таблиці Д3 вибирають тип автотрансформатора зв'язку та інші його параметри, які заносять у таблицю 1.4.

Таблиця 1.4

Тип автотрансформатора	S_n , МВА	U_{nc} , кВ	U_{nv} , кВ	U_{nn} , кВ	U_k , %		
					U_{vc}	U_{vn}	U_{cn}

Звичайно для надійності встановлюють два трифазних автотрансформа-

тори або групу із трьох однофазних. Сумарна потужність автотрансформаторів повинна бути не менше повної потужності, видаваній в систему. При відсутності однофазних трансформаторів відповідної потужності встановлюють групу із шести однофазних трансформаторів. Напруга середньої обмотки автотрансформатора $U_{нс}$ повинна відповідати напрузі ЛЕП, а напруга вищої обмотки $U_{нв}$ не повинна відрізнятися від напруги приймальної системи більш ніж на 20 %.

1.2. ТЕКСТ ЗАВДАННЯ

Для заданої схеми електропередачі виконати:

- Аналіз статичної стійкості:
 - розрахувати параметри елементів схеми заміщення;
 - розрахувати й побудувати кутові характеристики потужності, визначити межі переданої активної потужності та коефіцієнти запасу статичної стійкості без обліку навантаження у випадку нерегульованих генераторів, генераторів, постачених автоматичними регуляторами збудження (АРЗ) пропорційної дії, генераторів, постачених АРЗ сильної дії;
 - розрахувати і побудувати кутову характеристику потужності, визначити межу переданої активної потужності та коефіцієнт запасу статичної стійкості з урахуванням навантаження при наявності у всіх генераторів АРЗ пропорційної дії.
- Аналіз динамічної стійкості:
 - розрахувати та побудувати кутові характеристики потужності нормального режиму і при відключеному ланцюзі ЛЕП, визначити максимальний кут відхилення ротора генератора;
 - розрахувати та побудувати кутові характеристики потужності нормального, аварійного та післяаварійного режимів при різних видах короткого замикання на початку ЛЕП, визначити граничні кути відключення;
 - визначити граничний час відключення для кожного виду короткого замикання або максимальний кут відхилення ротора генератора, у випадку, якщо електропередача стійка в аварійному режимі;
 - проаналізувати вплив на динамічну стійкість заходів режимного характеру.

2. ВИМОГИ ДО ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ

Пояснювальна записка до курсової роботи повинна містити: титульний аркуш; реферат; зміст; перелік умовних позначень; вступ; основну частину; висновок; список джерел інформації; додатки (якщо вони є). Пояснювальна записка повинна бути виконана та оформлена відповідно до вимог ЕСКД.

Реферат – короткий виклад змісту курсової роботи, що включає основні відомості, необхідні для початкового ознайомлення з роботою. Реферат повинен містити: відомості про обсяг пояснювальної записки, перелік ключових слів, текст реферату. Обсяг реферату не повинен перевищувати однієї сторінки.

Відомості про обсяг пояснювальної записки включають: кількість сторінок,

кількість ілюстрацій, таблиць, джерел інформації і додатків.

Зміст включає структурні частини записки в наступній послідовності: вступ, найменування розділів і підрозділів основної частини записки, висновок, список джерел інформації, додатки. Слово сторінка або його скорочення не пишуть.

У вступі необхідно сформулювати завдання розрахунку статичної і динамічної стійкості ЕС, а також охарактеризувати математичний апарат і основні допущення, прийняті при розрахунках.

В основну частину включають: текст завдання; розрахункову схему електричної системи та параметри її елементів; схему заміщення електричної системи і розрахунок параметрів її елементів; розрахунок статичної стійкості; розрахунок динамічної стійкості.

У висновку повинні бути наведені короткі висновки за результатами виконаної роботи.

Список джерел інформації – це перелік джерел інформації, що згадуються. Джерела інформації записують у список джерел інформації по мірі появи на них посилань у тексті. Посилання на джерела інформації позначають порядковим номером, укладеним у квадратні дужки.

3. АНАЛІЗ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ

3.1. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ

Розрахунок ведеться у відносних одиницях по формулах точного приведення. Як базисні величини зручно прийняти: $S_{\bar{o}} = P_0$, $U_{\bar{o}} = U_0$, де P_0 – активна потужність передана генераторами в систему $P_0 = (1 - \frac{\alpha}{100}) \sum_{i=1}^n P_{Gi}$, причому $P_{Gi} = S_{Gi} \cos \varphi_{Gi}$, n – кількість генераторів. Базисна потужність $S_{\bar{o}}$ тільки чисельно дорівнює потужності P_0 ; напруга U_0 є параметром режиму і задається в якості базисного [2].

Вирази для розрахунку опорів елементів схеми заміщення наведені нижче. У пояснювальній записці необхідно спочатку окремим рядком записувати формулу в загальному виді, а в наступному рядку підставляти чисельні значення з наступним результатом і розмірністю.

Відносний опір нерегульованого генератора

$$\overset{\circ}{X}_{d*\bar{o}} = X_d \frac{S_{\bar{o}}}{S_n} \frac{U_n^2}{U_{\bar{o}}^2} K_T^2 K_{AT}^2,$$

де K_T , K_{AT} – відповідно коефіцієнт трансформації трансформатора та автотрансформатора,

$$K_T = \frac{U_{нв}}{U_{нн}} \text{ і } K_{AT} = \frac{U_{нв}}{U_{нс}}.$$

Відносний опір генератора з АРЗ пропорційної дії

$$\overset{\circ}{X}_{d*\bar{o}}' = X_d' \frac{S_{\bar{o}}}{S_n} \frac{U_n^2}{U_{\bar{o}}^2} K_T^2 K_{AT}^2.$$

Відносний опір генератора з АРЗ сильної дії дорівнює нулю.

Відносний опір трансформатора

$$\overset{\circ}{X}_{T*\bar{6}} = \frac{u_k \%}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_n} \frac{U_{нв}^2}{U_{\bar{6}}^2} K_{AT}^2.$$

Відносний опір лінії $\overset{\circ}{X}_{Л*\bar{6}} = X_{yo} L \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} K_{AT}^2,$

Відносний опір автотрансформатора $\overset{\circ}{X}_{AT*\bar{6}} = \frac{u_{KB-C} \%}{100} \frac{S_{\bar{6}}}{S_n} \frac{U_{нв}^2}{U_{\bar{6}}^2},$

Відносний опір реактора $\overset{\circ}{X}_{P*\bar{6}} = \frac{X_p \%}{100} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n} \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} K_T^2 K_{AT}^2$

або $\overset{\circ}{X}_{P*\bar{6}} = X_p (\text{Ом}) \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} K_T^2 K_{AT}^2.$

3.2. РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА КУТОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТУЖНОСТІ, ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ПЕРЕДАНОЇ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА КОЕФІЦІЄНТІВ ЗАПАСУ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ БЕЗ ОБЛІКУ НАВАНТАЖЕННЯ

Розрахунок необхідно провести для випадку нерегульованого генератора, генератора, постаченого АРЗ пропорційної дії та генератора, постаченого АРЗ сильної дії.

3.2.1. Нерегульований генератор.

Скласти схему заміщення на підставі розрахункової схеми, у якій генератор задається синхронними параметрами: електрорушійною силою (ЕРС) $E_{q*\bar{6}}$ і опором $X_{d*\bar{6}}$. Значення опорів елементів взяти з п. 3.1, присвоївши їм порядкові номери. Кожен опір елемента схеми заміщення позначається у вигляді дробі - у чисельнику вказується порядковий номер опору, у знаменнику - величина опору.

Приклад схеми заміщення КЕС наведений на рис. 3.1, а. Схему заміщення необхідно згорнути щодо шин системи нескінченної потужності та визначити сумарний опір передачі $X_{dрез*\bar{6}}$ (рис. 3.1, б).

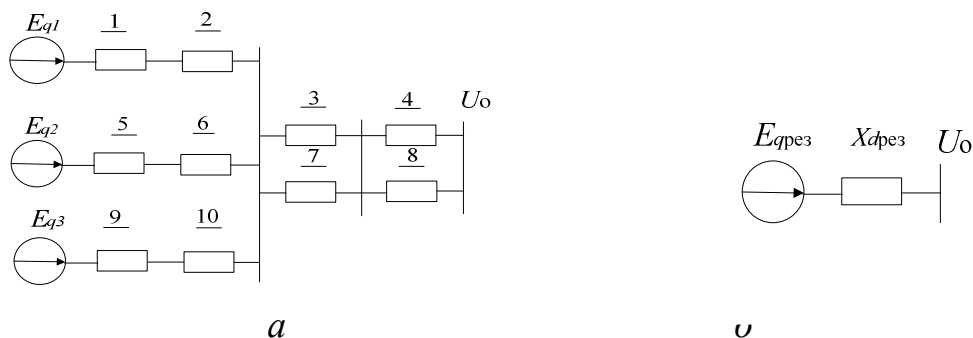


Рис. 3.1. Схема заміщення КЕС: а – вихідна; б – еквівалентна

$$\overset{\circ}{X}_{dрез*\bar{6}} = \overset{\circ}{X}_{dI*\bar{6}} + \overset{\circ}{X}_{II*\bar{6}},$$

де $\overset{\circ}{X}_{dI*\bar{6}}$ – еквівалентний опір генераторів, трансформаторів щодо шин високої

напруги трансформаторів; $\overset{\circ}{X}_{II*б}$ – еквівалентний опір ЛЕП і автотрансформатора,

$$\overset{\circ}{X}_{II*б} = \frac{\overset{\circ}{X}_{Л*б}}{2} + \frac{\overset{\circ}{X}_{АТ*б}}{2}.$$

Розрахувати активну та реактивну потужність, що надходить у систему, а також напругу приймальної системи у відносних одиницях

$$P_{o*б} = \frac{P_o (MBm)}{S_б (MBm)}, \quad Q_{o*б} = P_{o*б} \operatorname{tg} \varphi_o, \quad U_{o*б} = \frac{U_o (\kappa B)}{U_б (\kappa B)},$$

де $\varphi_o = \arccos \varphi_o$.

По знайденим $P_{o*б}$, $Q_{o*б}$ розраховують модуль ЕРС еквівалентного генератора

$$\overset{\circ}{E}_{qpez*б} = \sqrt{(U_{o*б} + Q_{o*б} \overset{\circ}{X}_{dpez*б} / U_{o*б})^2 + (P_{o*б} \overset{\circ}{X}_{dpez*б} / U_{o*б})^2},$$

і її аргумент

$$\delta = \arctg \frac{P_{o*б} \overset{\circ}{X}_{dpez*б}}{U_{o*б} + Q_{o*б} \overset{\circ}{X}_{dpez*б}}.$$

Задаючи кути δ від 0 до 180°, розраховують кутову характеристику потужності (КХП) по формулі

$$P_{Eq*б} = \frac{\overset{\circ}{E}_{qpez*б} U_{o*б}}{\overset{\circ}{X}_{dpez*б}} \sin \delta.$$

Результати розрахунку заносять у табл.3.1.

Таблиця 3.1

$\delta, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180
$P_{Eq*б}$	0						0

За результатами даних таблиці будують КХП.

Межу статичної стійкості одержують із рівняння $\frac{dP_{Eq*б}}{d\delta} = 0$, у цьому випадку $\delta_{np} = \pi / 2$.

Розраховують межу переданої потужності $P_{Eqnp*б} = \frac{\overset{\circ}{E}_{qpez*б} U_{o*б}}{\overset{\circ}{X}_{dpez*б}}.$

Розраховують коефіцієнт запасу статичної стійкості: $K_{CT} = \frac{P_{Eqnp*б} - P_{o*б}}{P_{o*б}}.$

Примітка. У подальших розрахунках індекс "*б" і "о" при відповідних величинах опустити, тому що дії проводяться тільки з відносними величинами, наведеними до ступеня напруги U_0 .

3.2.2. Генератори постачені АРЗ пропорційної дії.

Генератори ЕС із АРЗ пропорційної дії вводять у схему заміщення перехідною ЕРС E'_q і перехідним опором X'_d . Схему заміщення згортають щодо шин системи нескінченної потужності та визначають сумарний опір передачі

$$X'_{дрез} = X'_{dI} + X_{II},$$

де X'_{dI} – еквівалентний опір генераторів, трансформаторів щодо шин високої напруги трансформаторів.

Розраховують модуль ЕРС $E'_{рез} = \sqrt{(U_0 + Q_0 X'_{дрез} / U_0)^2 + (P_0 X'_{дрез} / U_0)^2}$,

і її аргумент $\delta' = \arctg \frac{P_0 X'_{дрез}}{U_0 + Q_0 X'_{дрез}}$.

Визначають модуль ЕРС $E'_{qрез} = E'_{рез} \cos(\delta - \delta')$.

Значення кута (взяти з п.3.2.1).

Задаючи кути δ від 0 до 180°, розраховують КХП по формулі

$$P_{E'_q} = \frac{E'_{qрез} U_0}{X'_{дрез}} \sin \delta - \frac{U_0^2}{2} \frac{X_{дрез} - X'_{дрез}}{X_{дрез} X'_{дрез}} \sin 2\delta.$$

Результати розрахунку заносять у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

$\delta, ^\circ$	0	30	60	90	δ_{np}	120	150	180
$P_{E'_q}$	0							0

За результатами даних таблиці будують КХП.

Межу статичної стійкості визначають із умови

$$\frac{dP_{E'_q}}{d\delta} = \frac{E'_{qрез} U_0}{X'_{дрез}} \cos \delta_{np} - \frac{U_0^2}{2} \frac{X_{дрез} - X'_{дрез}}{X_{дрез} X'_{дрез}} \cos 2\delta_{np} = 0.$$

Варто перейти від косинуса подвійного кута до косинуса одинарного кута та вирішити квадратне рівняння щодо косинуса шуканого кута, звідки одержують

$$\delta_{np1,2} = \arccos \frac{P_{m1} \pm \sqrt{P_{m1}^2 + 32P_{m2}^2}}{8P_{m2}},$$

$$\text{де } P_{m1} = \frac{E'_{qрез} U_0}{X'_{дрез}}, \quad P_{m2} = \frac{U_0^2}{2} \frac{X_{дрез} - X'_{дрез}}{X_{дрез} X'_{дрез}}.$$

У більшості випадків рішенням квадратного рівняння є тільки один кут, значення другого кута не існує, тому що значення функції косинуса не може бути більше одиниці.

У випадку якщо рішенням квадратного рівняння є два кути, то необхідно вибрати той, який задовольняє умові $\delta_{np} > 90^\circ$.

Розраховують межу переданої потужності $P_{E'_{qnp}} = P_{m1} \sin \delta_{np} - P_{m2} \sin 2\delta_{np}$

Розраховують коефіцієнт запасу статичної стійкості $K_{CT} = \frac{P_{E'_{qnp}} - P_0}{P_0}$.

3.2.3. Генератори постачені АРЗ сильної дії.

Генератори ЕС із АРЗ сильної дії вводять в схему заміщення напругою $U_{Гq}$ та опором $X_{Г} = 0$. Схему заміщення звертають щодо шин системи нескінченної потужності та визначають сумарний опір передачі

$$X_{рез} = X_I + X_{II},$$

де X_I – еквівалентний опір трансформаторів і реакторів щодо шин високої напруги трансформаторів.

Розраховують модуль напруги генератора

$$U_{Грез} = \sqrt{\left(U_0 + \frac{Q_0 X_{рез}}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{P_0 X_{рез}}{U_0}\right)^2}$$

і його аргумент $\delta_{Г} = \arctg \frac{P_0 X_{рез}}{U_0 + Q_0 X_{рез}}$,

Визначають модуль напруги $U_{Гqрез} = U_{Грез} \cos(\delta - \delta_{Г})$.

Значення кута (взяти з п.3.2.1.

Задаючи кути δ від 0 до 180°, розраховують КХП за формулою

$$P_{U_{Гq}} = \frac{U_{Гqрез} U_0}{X_{рез}} \sin \delta - \frac{U_0^2}{2} \frac{X_{дрез} - X_{рез}}{X_{дрез} X_{рез}} \sin 2\delta.$$

Результати розрахунку заносять у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

$\delta, ^\circ$	0	30	60	90	δ_{np}	120	150	180
$P_{U_{Гq}}$	0							0

За результатами дані таблиці будують КХП.

Визначають межу статичної стійкості

$$\delta_{np} = \arccos \frac{P_{m1} \pm \sqrt{P_{m1}^2 + 32P_{m2}^2}}{8P_{m2}},$$

де $P_{m1} = \frac{U_{Гqрез} U_0}{X_{рез}}$, $P_{m2} = \frac{U_0^2}{2} \frac{X_{дрез} - X_{рез}}{X_{дрез} X_{рез}}$.

Розраховують межу переданої потужності $P_{U_{Гq}np} = P_{m1} \sin \delta_{np} - P_{m2} \sin 2\delta_{np}$.

Розраховують коефіцієнт запасу статичної стійкості $K_{CT} = \frac{P_{U_{Гq}np} - P_0}{P_0}$.

3.2.4. Розрахунок і побудова кутових характеристик потужності, визначення межі переданої активної потужності та коефіцієнт запасу статичної стійкості з урахуванням навантаження при наявності у всіх генераторів АРЗ пропорційної дії.

Вмикання навантаження перетворює досліджувану систему в складну, і тому варто скористатися виразом кутової характеристики потужності генератора, що працює в складній системі [3]

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 U_0}{Z_{10}} \sin(\delta_{10} - \alpha_{10}).$$

Неявнополіусний генератор с регулятором пропорційної дії вводиться в схему заміщення ЕРС E'_q і опором X'_d (рис. 3.2).

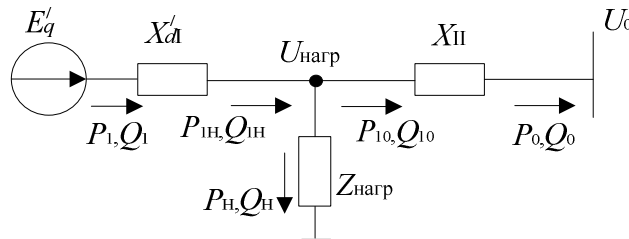


Рис. 3.2. Схема заміщення ЕС із урахуванням навантаження

Визначають модуль напруги на шинах навантаження

$$U_{\text{нагр}} = \sqrt{\left[U_0 + \frac{Q_0}{U_0} X_{II} \right]^2 + \left[\frac{P_0}{U_0} X_{II} \right]^2}$$

і його аргумент

$$\delta_{\text{нагр}} = \arctg \frac{\frac{P_0}{U_0} X_{II}}{U_0 + \frac{Q_0}{U_0} X_{II}}.$$

Розраховують потужність, споживану навантаженням

$$P_{\text{нагр}} = \frac{\alpha\%}{100} \sum_{i=1}^n P_{Gi}, \quad Q_{\text{нагр}} = P_{\text{нагр}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{нагр}}, \quad \underline{S}_{\text{нагр}} = P_{\text{нагр}} + jQ_{\text{нагр}}$$

Визначають потужність, що впливає з вузла навантаження в систему

$$\underline{S}_{10} = P_0 + j \left(Q_0 + \frac{P_0^2 + Q_0^2}{U_0^2} X_{II} \right) = P_{10} + jQ_{10}.$$

Визначають потужність, що притікає до вузла навантаження від станції

$$\underline{S}_{1H} = \underline{S}_{\text{нагр}} + \underline{S}_{10} = P_{1H} + jQ_{1H}$$

Розраховують ЕРС генератора без АРЗ

$$\underline{E}_q = \underline{U}_{нагр} + j \frac{\underline{S}_{1н}^*}{\underline{U}_{нагр}} X_{dl} = E_{qa} + jE_{qp} = E_q e^{j\delta},$$

де $\underline{U}_{нагр}$ – комплекс напруги на шинах навантаження; $\underline{U}_{нагр} = U_{нагр} e^{j\delta_{нагр}}$;

$\underline{U}_{нагр}^*$ – сполучений комплекс напруги на шинах навантаження;

$$\underline{U}_{нагр}^* = U_{нагр} e^{-j\delta_{нагр}};$$

$\underline{S}_{1н}^*$ – сполучений комплекс потужності, що притікає до вузла навантаження

$$\underline{S}_{1н}^* = P_{1н} - jQ_{1н}.$$

Значення X_{dl} взяти з п.3.2.1.

Розраховують ЕРС генератора з АРЗ пропорційної дії

$$\underline{E}' = \underline{U}_{нагр} + j \frac{\underline{S}_{1н}^*}{\underline{U}_{нагр}} X'_{dl} = E'_a + jE'_p = E' e^{j\delta'}.$$

Значення X'_{dl} взяти з п.3.2.2.

Визначають модуль ЕРС генератора з АРЗ пропорційної дії $E'_q = E' \cos(\delta - \delta')$.

Комплексні значення опорів Z_{11} і Z_{10} визначають зі схем заміщення ЕС із урахуванням навантаження по формулах:

$$\underline{Z}_{11} = jX'_{dl} + \underline{Z}_{нагр} \parallel jX_{II} = Z_{11} e^{j\psi_{11}}, \quad \underline{Z}_{10} = jX'_{dl} + jX_{II} + \frac{jX'_{dl} jX_{II}}{\underline{Z}_{нагр}} = Z_{10} e^{j\psi_{10}}.$$

Кути α_{11} та α_{10} розраховують по формулах: $\alpha_{11} = \frac{\pi}{2} - \psi_{11}$, $\alpha_{10} = \frac{\pi}{2} - \psi_{10}$.

Задаючи кути δ від 0 до 180°, розраховують КХП по формулі

$$P = \frac{E_q'^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E'_q U_0}{Z_{10}} \sin (\delta_{10} - \alpha_{10}).$$

Результати розрахунку заносять у табл. 3.4.

Таблиця 3.4

$\delta, ^\circ$	0	30	60	90	δ_{np}	120	150	180
$P_{U_{Гq}}$								

За результатами даних таблиці будують КХП.

Межу статичної стійкості $\delta_{np} = 90^\circ + \alpha_{10}$ визначають із умови $\left. \frac{dP}{d\delta_{10}} \right|_{\delta_{10} = \delta_{np}} = 0$.

Розраховують межу переданої потужності $P_{np} = \frac{E_q'^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_q' U_0}{Z_{10}}.$

Розраховують коефіцієнт запасу статичної стійкості $K_{CT} = \frac{P_{np} - P_0}{P_0}.$

Висновки

Отримані результати необхідно представити у вигляді таблиці (табл. 3.5) і зробити висновки про вплив АРЗ і навантаження на межу переданої потужності, межу статичної стійкості та коефіцієнт запасу статичної стійкості.

Таблиця 3.5

Наявність і тип АРЗ	P_{np}	δ_{np}	κ_{CT}
без АРЗ без обліку навантаження			
з АРЗ пропорційної дії без обліку навантаження			
з АРЗ сильної дії без обліку навантаження			
з АРЗ пропорційної дії з урахуванням навантаження			

Контрольні питання

1. У яких одиницях проводять розрахунок статичної стійкості?
2. Як визначають значення базисної напруги та потужності?
3. Що таке статична, динамічна та результуюча стійкість?
4. Які збурювання вважаються малими і які великими?
5. По яких ознаках поділяють системи на прості та складні?
6. Що таке статична та динамічна характеристики системи?
7. Що таке кутова характеристика потужності і у чому її необхідність?
8. Що таке кут δ ?
9. Що таке межа переданої потужності, межа статичної стійкості та коефіцієнт запасу статичної стійкості?
10. Назвіть практичний критерій статичної стійкості.
11. Якими параметрами вводяться в схему заміщення генератори без АРЗ, з АРЗ пропорційної та сильної дії?
12. Який АРЗ називається регулятором пропорційної і який сильної дії?
13. Чим відрізняється КХП простої системи, що містить генератор з АРЗ від КХП системи з нерегульованим генератором?
14. Як впливає регулювання порушення генераторів на статичну стійкість?
15. На якій ділянці КХП можлива усталена робота системи?
16. Як впливає облік навантаження на статичну стійкість?
17. Яким повинен бути у відповідності із провідними вказівками по стійкості енергосистем мінімальний коефіцієнт запасу по активній потужності та напрузі в нормальному режимі?

4. АНАЛІЗ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ

У розрахунках динамічної стійкості генератор у схемі заміщення задається опором X_d' і ЕРС E' незалежно від наявності або відсутності АРЗ. Основними спрощеними методами аналізу динамічної стійкості електроенергетичних систем є:

метод площ і метод послідовних інтервалів. При цьому приймаються наступні допущення [4]:

- електрична потужність змінюється миттєво при переході від одного режиму до іншого;
- відхилення частоти обертання роторів генераторів від синхронної частоти малі;
- обертаючий момент турбіни в перехідному процесі не змінюється;
- нелінійність параметрів системи не враховується;
- перехідні процеси розглядаються на обмеженому інтервалі часу;
- сукупність генераторів замінюється одним еквівалентним.

4.1. РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА КУТОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТУЖНОСТІ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМУ Й ПРИ ВІДКЛЮЧЕНОМУ ЛАНЦЮЗІ ЛЕП, ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО КУТА ВІДХИЛЕННЯ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА

Задаючи кути δ від 0 до 180°, розраховують КХП нормального (вихідного) режиму по формулі

$$P^I = P_m^I \sin \delta,$$

де $P_m^I = \frac{E'_{рез} U_0}{X'_{дрезI}}$, причому $X'_{дрезI} = X'_{dl} + \frac{X_L}{2} + \frac{X_{AT}}{2}$.

Значення $E'_{рез}$ та $X'_{дрезI}$ взяти з п.3.2.2.

Задаючи кути δ від 0 до 180°, розраховують КХП при відключеному ланцюзі ЛЕП по формулі

$$P^{II} = P_m^{II} \sin \delta,$$

де $P_m^{II} = \frac{E'_{рез} U_0}{X'_{дрезII}}$, причому $X'_{дрезII} = X'_{dl} + X_L + \frac{X_{AT}}{2}$.

Результати розрахунків заносять у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

$\delta, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180
P^I							
P^{II}							

За результатами даних таблиці будують кутові характеристики потужності, на яких позначають площадку прискорення $A_{уск}$ і можливого гальмування $A_{возм.торм}$ (рис. 4.1)

Користуючись методом площ, визначають максимальний кут

$$\delta_{max} = \delta_o + \frac{P_m^{II}}{P_o} (\cos \delta_o - \cos \delta_{max})$$

зі співвідношення $\int_{\delta_o}^{\delta'_o} (P_o - P^I) d\delta = \int_{\delta'_o}^{\delta_{max}} (P^{II} - P_o) d\delta$, де $\delta_o = \arcsin \frac{P_o}{P_m^I}$.

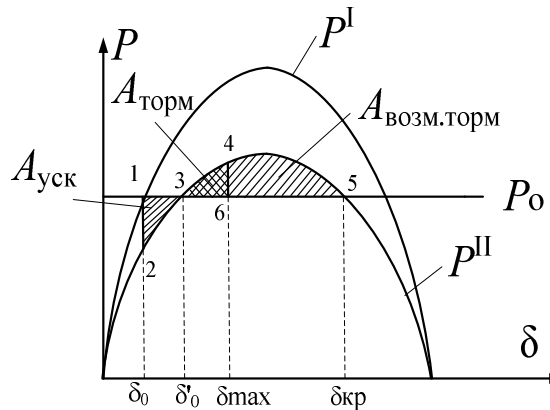


Рис. 4.1. Кутові характеристики нормального режиму P^I і при відключеному ланцюзі ЛЕП P^{II}

Рівняння вирішують методом ітерацій, як перше наближення приймають кут $\delta_{max1} = \delta'_o + (\delta'_o - \delta_o)$, де $\delta'_o = \arcsin \frac{P_o}{P_m^{II}}$. Якщо ітераційний процес не сходиться, то рівняння необхідно переписати

$$\delta_{max} = \frac{\arccos\left(\delta_o + \frac{P_m^{II}}{P_o} \cos \delta_o - \delta_{max}\right)}{\frac{P_m^{II}}{P_o}}.$$

За знайденим значенням кута δ_{max} позначають площадку гальмування $A_{торм}$, що потім порівнюють із площадкою прискорення (рис. 4.1). Якщо кут знайдений вірно, то $A_{уск} = A_{торм}$.

4.2. РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА КУТОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТУЖНОСТІ НОРМАЛЬНОГО, АВАРІЙНОГО ТА ПІСЛЯАВАРІЙНОГО РЕЖИМІВ ПРИ РІЗНИХ ВИДАХ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ НА ПОЧАТКУ ЛЕП, ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ КУТІВ ВІДКЛЮЧЕННЯ

Коротке замикання (КЗ) відбувається на початку одного з ланцюгів ЛЕП з боку генераторів.

Для кожного виду КЗ будують КХП нормального, аварійного, післяаварійного режимів. При побудові кутових характеристик нормального P^I і післяаварійного режимів P^{II} для всіх видів короткого замикання дані беруть із п.4.1.

Задаючи кути δ від 0 до 180°, розраховують КХП аварійного режиму для кожного виду КЗ по формулі

$$P^{III} = P_m^{III} \sin \delta,$$

де $P_m^{III} = \frac{E'_{рез} U_0}{X_{ав}}$, причому $X_{ав} = X'_{dl} + \frac{X_{Л}}{2} + \frac{X_{АТ}}{2} + \frac{X'_{dl} (X_{Л}/2 + X_{АТ}/2)}{X_{\Delta}^{(n)}}$.

Опір аварійного шунта $X_{\Delta}^{(n)}$ залежить від виду короткого замикання:

$$X_{\Delta}^{(I)} = X_{2рез} + X_{0рез}, \quad X_{\Delta}^{(2)} = X_{2рез}, \quad X_{\Delta}^{(I,1)} = X_{2рез} \parallel X_{0рез},$$

де $X_{2рез}$ та $X_{0рез}$ – результуючий опір зворотної та нульової послідовності відповідно [2].

Для визначення результуючого опору зворотної та нульової послідовності необхідно скласти схеми заміщення відповідних послідовностей і перетворити їх щодо точки КЗ.

На рис.4.2 наведений приклад схеми заміщення зворотної та нульової послідовності КЕС.

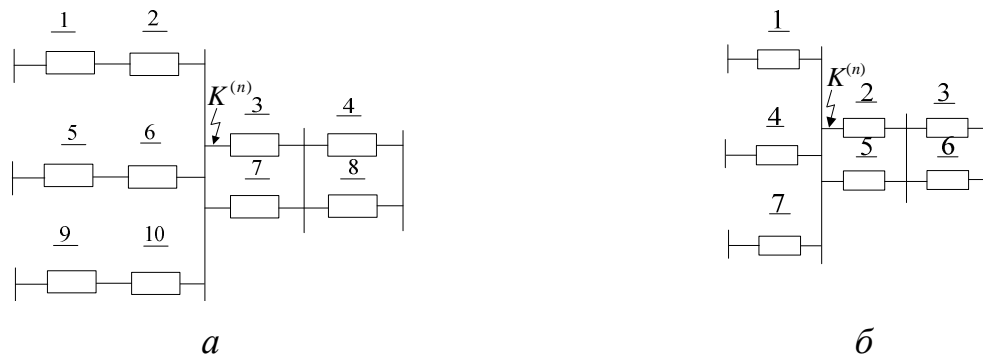


Рис. 4.2. Схема заміщення КЕС: *а* – зворотної послідовності; *б* – нульової послідовності

Результати розрахунків заносять у табл.4.2.

Таблица 4.2

$\delta, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180
$P^{III(1)}$							
$P^{III(2)}$							
$P^{III(1,1)}$							
$P^{III(3)}$							

За результатами дані таблиці будують кутові характеристики потужності.

Граничний кут відключення КЗ $\delta_{пр.откл}$ визначають у градусах по формулі

$$\delta_{пр.откл} = \arccos \frac{P_o(\delta_{кр} - \delta_o) + P_m^{II} \cos \delta_{кр} - P_m^{III} \cos \delta_o}{P_m^{II} - P_m^{III}},$$

яка отримана з рівності $\int_{\delta_o}^{\delta_{пр.откл}} (P_o - P^{III}) d\delta = \int_{\delta_{пр.откл}}^{\delta_{кр}} (P^{II} - P_o) d\delta$,

де $\delta_o = \arcsin \frac{P_o}{P_m^I}$; $\delta_{кр} = \pi - \arcsin \frac{P_o}{P_m^I}$ (значення кутів необхідно одержати в радіанах).

Розрахунки проводять для всіх видів КЗ, після чого позначають площадки

прискорення та можливого гальмування. Якщо кут знайдений вірно, то $A_{\text{уск}} = A_{\text{возм.торм.}}$.

Примітка. У деяких випадках однофазного КЗ динамічна стійкість зберігається навіть без відключення КЗ, у цьому випадку $\delta_{\text{пр.откл}}$, як рішення рівняння не існує.

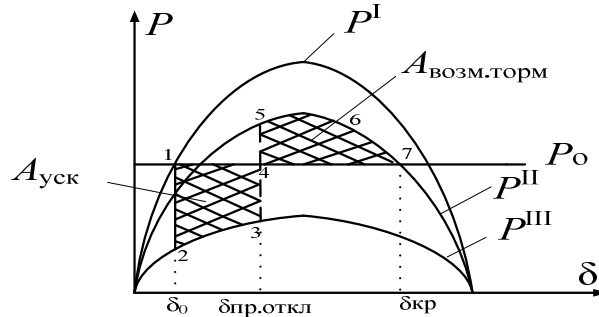


Рис. 4.3. Кутові характеристики нормального режиму P^I , післяаварійного режиму (при відключеному ланцюзі ЛЕП) P^{II} , аварійного режиму P^{III}

4.3. ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ЧАСУ ВІДКЛЮЧЕННЯ ДЛЯ КОЖНОГО ВИДУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ АБО МАКСИМАЛЬНОГО КУТА ВІДХИЛЕННЯ РОТОРА ГЕНЕРАТОРА, У ВИПАДКУ, ЯКЩО ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧА СТІЙКА В АВАРІЙНОМУ РЕЖИМІ

Розрахунок граничного часу відключення проводиться при використанні методу послідовних інтервалів. Цей метод заснований на чисельному рішенні основного рівняння руху ротора генератора

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \omega_0 (P_0 - P_{\text{эл}}),$$

де ω_0 – кутова синхронна швидкість $\omega_0 = 314 \frac{1}{c}$;

P_0 – потужність турбіни у відносних одиницях (в.о.), $P_0 = 1$;

$P_{\text{эл}}$ – електрична потужність генератора (в.о.);

$$P_{\text{эл}} = P_m \sin \delta;$$

де P_m – амплітуда КХП;

T_j – постійна інерції еквівалентного генератора (в.о.),

$$T_j = \frac{J_s \omega_0^2 10^{-3}}{S_{\delta}};$$

де J_s – момент інерції еквівалентного генератора,

$$J_s = \sum J_{Gi} (\text{т} \times \text{м}^2).$$

Завданням рішення є визначення в перехідному процесі функції $\delta(t)$.

Порядок розрахунку:

- Вибирають крок інтегрування не менш $\Delta t = 0,01\text{с}$ і визначають початкові умови

$$\delta_{(0)} = \delta_0 = \arcsin \frac{P_0}{P_m^I}; \quad \Delta P_{(0)} = P_0 - P_m^{III} \sin \delta_{(0)}.$$

Значення кута δ_0 необхідно визначити в градусах.

Значення амплітуд характеристик потужності вихідного (P_m^I), аварійного (P_m^{III}) і післяаварійного (P_m^{II}) режимів беруть із попередніх розрахунків.

- Розраховують збільшення кута $\Delta\delta_{(1)}$ в градусах до кінця першого інтервалу

$$\Delta\delta_{(1)} = k \frac{\Delta P_{(0)}}{2},$$

$$\text{де } k = \frac{360 f \Delta t^2}{T_j}.$$

- Знаючи збільшення кута δ на першому інтервалі, розраховують абсолютне значення кута наприкінці цього інтервалу або, щось же саме, на початку наступного інтервалу

$$\delta_{(1)} = \delta_{(0)} + \Delta\delta_{(1)}.$$

- Для нового значення кута $\delta_{(1)}$ визначають надлишок потужності $\Delta P_{(1)}$ на другому інтервалі часу

$$\Delta P_{(1)} = P_0 - P_m^{III} \sin \delta_{(1)}.$$

- Розраховують збільшення кута $\Delta\delta_{(2)}$ до кінця другого інтервалу й абсолютне значення кута наприкінці цього інтервалу:

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + k\Delta P_{(1)}, \quad \delta_{(2)} = \delta_{(1)} + \Delta\delta_{(2)}.$$

Розрахунок на наступних інтервалах ведеться аналогічно по формулах:

$$\Delta P_{(n-1)} = P_0 - P_m^{III} \sin \delta_{(n-1)}, \quad \Delta\delta_{(n)} = \Delta\delta_{(n-1)} + k\Delta P_{(n-1)}, \quad \delta_{(n)} = \delta_{(n-1)} + \Delta\delta_{(n)}.$$

Розрахунок ведуть доти, поки значення кута δ не досягне граничного кута відключення або почне зменшуватися, якщо система динамічно стійка в аварійному режимі. Розрахунок проводять для всіх видів короткого замикання. Результати розрахунку зводять у табл. 4.3

Таблиця 4.3

$t, \text{з}$	град.	Δt	$2\Delta t$	$3\Delta t$...	$n\Delta t$
$\delta^{(1)}, ^\circ$	δ_0					
$\delta^{(2)}, ^\circ$	δ_0					
$\delta^{(1,1)}, ^\circ$	δ_0					
$\delta^{(3)}, ^\circ$	δ_0					

За даними таблиці будують залежності $\delta = f(t)$. По цим залежностям, знаючи граничний кут відключення, знаходять граничний час відключення для

кожного виду короткого замикання $t_{пр.ор.о}$ (рис. 4.4).

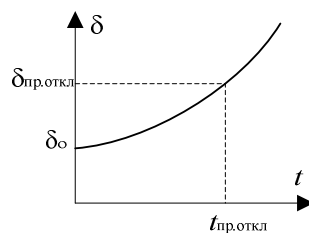


Рис. 4.4. Залежність $\delta(t)$

Для аналізу динамічної стійкості необхідно порівняти граничний час відключення короткого замикання $t_{пр.ор.о}$ з дійсним часом відключення короткого замикання $t_{д.откл}$ та зробити висновок про динамічну стійкість системи при різних видах КЗ. Дійсний час відключення короткого замикання $t_{д.откл}$ визначається часом дії релейного захисту $t_{рз}$ і власним часом відключення вимикача $t_{ОВ}$, тобто $t_{д.откл} = t_{рз} + t_{ОВ}$.

У розрахунках необхідно прийняти $t_{рз} = 0,02 - 0,04$ с; $t_{ОВ} = 0,08 - 0,2$ с.

4.4. ПРОАНАЛІЗУВАТИ ВПЛИВ НА ДИНАМІЧНУ СТІЙКІСТЬ ЗАХОДІВ РЕЖИМНОГО ХАРАКТЕРУ

Завданням аналізу динамічної стійкості з урахуванням дії заходів режимного характеру є визначення чисельного значення коефіцієнта динамічної стійкості.

Розрахувати коефіцієнт динамічної стійкості без урахування заходів

$$K_{ду} = \frac{A_{вт}}{A_{уск}},$$

$$\text{де } A_{уск} = \int_{\delta_0}^{\delta_{д.откл}} (P_0 - P_m^{\text{III}} \sin \delta) d\delta = P_0 (\delta_{д.откл} - \delta_0) + P_m^{\text{III}} (\cos \delta_{д.откл} - \cos \delta_0),$$

$$A_{возм.торм} = \int_{\delta_{д.откл}}^{\delta_{кр}} (P_m^{\text{II}} \sin \delta - P_0) d\delta = -P_m^{\text{II}} (\cos \delta_{кр} - \cos \delta_{д.откл}) - P_0 (\delta_{кр} - \delta_{д.откл}).$$

Значення кутів δ_0 , $\delta_{кр}$ необхідно взяти з п. 4.2. Значення кута $\delta_{д.откл}$ знайти по відповідній кривій $\delta = f(t)$ для трифазного та двофазного КЗ на землю, знаючи дійсний час відключення $t_{д.откл}$.

4.4.1. Аналіз впливу на динамічну стійкість автоматичного повторного включення (АПВ).

КХП вихідного, аварійного (при трифазному та двофазному на землю) і післяаварійного режимів взяти з п. 4.1, 4.2.

Для розрахунку площадки можливого гальмування з урахуванням дії АПВ необхідно знати кут повторного включення $\delta_{пв}$. Це кут, при якому

відбувається перехід з КХП післяаварійного режиму на КХП вихідного режиму. Для знаходження значення кута $\delta_{\text{пв}}$ необхідно розрахувати залежність $\delta = f(t)$. Розрахунок здійснюють аналогічно попередньому, змінюючи формулу для визначення надлишку потужності ΔP :

на проміжку часу від 0 до $t_{\text{д.откл}}$

$$\Delta P = P_0 - P_m^{\text{III}} \sin \delta ;$$

у момент $t = t_{\text{д.откл}}$

$$\Delta P = \frac{\Delta P_{t_{\text{д.откл}}}^{\text{II}} + \Delta P_{t_{\text{д.откл}}}^{\text{III}}}{2} ,$$

де $\Delta P_{t_{\text{д.откл}}}^{\text{II}} = P_0 - P_m^{\text{II}} \sin \delta_{\text{д.откл}}$, $\Delta P_{t_{\text{д.откл}}}^{\text{III}} = P_0 - P_m^{\text{III}} \sin \delta_{\text{д.откл}}$; на проміжку від $t_{\text{д.откл}}$ до $t_{\text{пв}} + t_{\text{д.откл}}$

$$\Delta P = P_0 - P_m^{\text{II}} \sin \delta .$$

Час повторного включення $t_{\text{пв}}$ визначається часом дії пристроїв АПВ $t_{\text{АПВ}}$ і власним часом включення вимикача $t_{\text{вв}}$, тобто $t_{\text{пв}} = t_{\text{АПВ}} + t_{\text{вв}}$.

У розрахунках необхідно прийняти $t_{\text{АПВ}} = 0,2 - 0,5$ с; $t_{\text{вв}} = 0,08 - 0,2$ с.

Залежність $\delta = f(t)$ розраховують доти, поки час t не стане більше $t_{\text{пв}} + t_{\text{д.откл}}$ або кут δ не почне зменшуватися.

Результати розрахунку заносять у табл. 4.4

Таблиця 4.4

$t, \text{с}$	о	Δt	$2\Delta t$...	$t_{\text{д.откл}}$...	$t_{\text{д.откл}} + t_{\text{пв}}$	$t_{\text{д.откл}} + t_{\text{пв}} + \Delta t$
$\delta, ^\circ$	δ_0				$\delta_{\text{д.откл}}$			

За результатами дані таблиці будують залежність $\delta = f(t)$ (рис. 4.5).

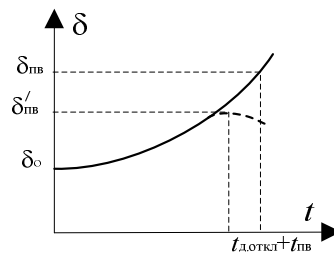


Рис. 4.5. Залежність $\delta(t)$

По побудованій залежності знайти кут переходу з характеристики P^{II} на P^{I} $\delta_{\text{пв}}$. Позначити площадку прискорення та можливого гальмування (рис. 4.6).

Розрахувати площадку можливого гальмування з урахуванням АПВ

$$\begin{aligned}
 A_{\text{возм.торм}} &= \int_{\delta_{\text{д.откл}}}^{\delta_{\text{пв}}} (P_m^{\text{III}} \sin \delta - P_0) d\delta + \int_{\delta_{\text{пв}}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_m^{\text{I}} \sin \delta - P_0) d\delta = \\
 &= -P_m^{\text{III}} (\cos \delta_{\text{пв}} - \cos \delta_{\text{д.откл}}) - P_m^{\text{I}} (\cos \delta_{\text{кр}} - \cos \delta_{\text{пв}}) + P_0 (\delta_{\text{д.откл}} - \delta_{\text{кр}}) ,
 \end{aligned}$$

де $\delta_{кр} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_m^I}$.

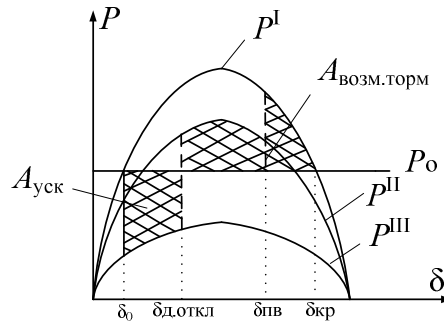


Рис. 4.6. Кутові характеристики нормального режиму P^I , післяаварійного режиму P^{II} , аварійного режиму P^{III}

Розрахувати коефіцієнт динамічної стійкості з урахуванням АПВ

$$K_{\text{дуАПВ}} = \frac{A_{\text{возм.торм}}}{A_{\text{уск}}}.$$

Порівняти коефіцієнти динамічної стійкості без урахування та з урахуванням АПВ, зробити висновок про вплив АПВ на динамічну стійкість.

4.4.2. Аналіз впливу на динамічну стійкість аварійного розвантаження турбіни.

Аварійне розвантаження турбіни (АРТ) зводяться до протиаварійного зменшення потужності турбіни P_T з наступним збільшенням її (рис.4.7).

Прийняти зміну потужності турбіни за законом

$$P_T(t) = P_0[F_1(t) + F_2(t)],$$

де функції

$$F_1(t) = \begin{cases} 1, t < \tau_1 \\ e^{-\frac{(t-\tau_1)}{T_a}}, \tau_1 \leq t < \tau_2 + \tau_1 \\ e^{-\frac{\tau_2}{T_a}}, t \geq \tau_2 + \tau_1 \end{cases}; \quad F_2(t) = \begin{cases} 0, t < \tau_2 + \tau_1 \\ 1 - e^{-\frac{(t-(\tau_1+\tau_2))}{T_a}}, \tau_2 + \tau_1 \leq t < \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \\ 1 - e^{-\frac{\tau_3}{T_a}}, t \geq \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \end{cases};$$

де τ_1 – час запізнювання в дії автоматики розвантаження, $\tau_1 = 0,2$ с;

τ_2 – час розвантаження турбіни (тривалість керуючого імпульсу), $\tau_2 = 0,1 - 2$ с;

τ_3 – час завантаження турбіни, $\tau_3 \cong \tau_2$; T_a – постійна часу АРТ;

$$T_a = \frac{t_{\text{полн.разгр}}}{4,6};$$

де $t_{\text{полн.разгр}}$ – час повного розвантаження турбіни, $t_{\text{полн.разгр}} = 2$ с.

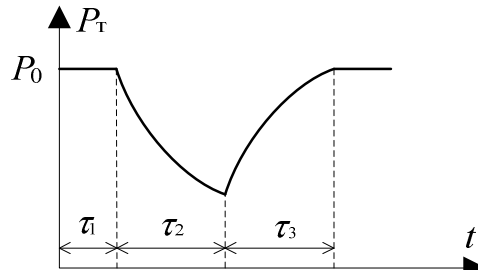


Рис. 4.7. Залежність $P_T = f(t)$

КХП всіх режимів взяти з п.4.2.

Розрахувати площадку прискорення та можливого гальмування з урахуванням дії АРТ

$$A_{\text{возм.торм}} = \int_{\delta_{\text{д.откл.АРТ}}}^{\delta_{\text{крАРТ}}} [P_m^{\text{II}} \sin \delta - P_T(t)] d\delta, \quad A_{\text{уск}} = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{д.откл.АРТ}}} [P_T(t) - P_m^{\text{III}} \sin \delta] d\delta,$$

де $\delta_{\text{д.откл.АРТ}}$ – дійсний кут відключення ланцюга ЛЕП при АРТ,

$\delta_{\text{крАРТ}}$ – кут, що відповідає точці перетинання характеристик $P_T = f(\delta)$ і $P_m^{\text{II}} = f(\delta)$ після 90° .

Розрахувати коефіцієнт динамічної стійкості з урахуванням АРТ

$$K_{\text{дуАРТ}} = \frac{A_{\text{возм.торм}}}{A_{\text{уск}}}.$$

Зрівняти коефіцієнти динамічної стійкості без урахування та з урахуванням АРТ, зробити висновок про вплив АРТ на динамічну стійкість.

Контрольні питання

1. Назвіть завдання аналізу динамічної стійкості ЕС.
2. Назвіть критерій динамічної стійкості.
3. Що таке максимальний кут відхилення ротора генератора при відключенні однієї з ланцюгів ЛЕП?
4. Що таке критичний кут?
5. Як впливає вид КЗ на величину амплітуди КХП?
6. Що таке граничний кут відключення і як його визначити?
7. Що такий граничний час відключення і як його визначити?
8. Який вид КЗ є найбільш важким з погляду збереження динамічної стійкості?
9. При якому виді КЗ швидкість зміни кута найбільша та чому?
10. Чому при відключенні одного з паралельних ланцюгів ЛЕП виникають хитання ротора генератора?
11. Як можна оцінити величину запасу динамічної стійкості?
12. Назвіть можливі шляхи підвищення запасу стійкості в умовах завдання, що розраховується.

13. Назвіть фізичний зміст площадок прискорення та гальмування, граничного кута відключення, як вони визначаються?
14. Який вплив робить маса ротора генератора на динамічну стійкість?
15. Як залежить величина граничного кута відключення КЗ від постійної інерції генератора і чому?
16. Як впливає на запас динамічної стійкості неврахування впливу автоматичного регулятора швидкості турбіни при розрахунках?
17. При яких умовах можливо одержання по формулі граничного кута відключення абсурдного результату, а саме $\cos \delta_{\text{пр.откл}} > 1$?
18. Як визначити величину ковзання ротора генератора на *i-інтервалі* розрахунку?
19. Який знак похибки розрахунку кута вильоту ротора по методу послідовних інтервалів?
20. Дайте фізичне пояснення явища «стрибка» синхронної ЕРС генератора при раптовій зміні режиму.
21. Вкажіть характер зміни амплітуди КХП залежно від виду КЗ при глухозаземленої нейтралі, ізольованої нейтралі або заземленої нейтралі через активний (індуктивний) опір нейтралі трансформатора.
22. Поясніть характер зміни різних ЕРС у часі при перехідному процесі (включаючи момент виникнення й відключення КЗ).
23. Як варто інтерпретувати знак чисельної величини взаємного відносного прискорення генераторів?
24. Поясніть фізичну природу демпферного моменту.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Неклепаев Б. Н. Электрическая часть электрических станций и подстанций: Учебник для вузов / Б. Н. Неклепаев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
2. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы / С. А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
3. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. – М.: Высш. школа, 1985. – 516 с.
4. Винославский В. Н. Переходные процессы в системах электроснабжения / В. Н. Винославский. – М.: Высш. школа, 1989. – 422 с.

ДОДАТОК

Таблиця Д1 - Параметри генераторів

Тип генератора	S_n , МВА	U_n , кВ	X_d , в.о.	X'_d , в.о.	J , $T \times M^2 \times 0,25$	$\cos \varphi_n$
Т-20-2У3	25	6,3	2,07	0,2	2,6	0,8
ТВС-32У3	40	10,5	2,64	0,26	5,4	0,8
ТВС-32У3	40	6,3	2,458	0,238	2,6	0,8
ТВФ-63-2У3	78,75	6,3	1,199	0,224	9,7	0,8
ТВФ-63-2ЕУ3	78,75	10,5	1,5131	0,202	8,85	0,8
ТВФ-100-2У3	125	10,5	1,907	0,278	13	0,8
ТВВ-160-2ЕУ3	188	18	1,713	0,304	17,5	0,85
ТГВ-200-2У3	235,3	15,75	1,84	0,295	21,1	0,85
ТГВ-200-2МУ3	247	15,75	2	0,34	25	0,85
ТВВ-220-2ЕУ3	258,3	15,75	1,88	0,275	21,1	0,85
ТГВ-300-2У3	353	20	2,195	0,3	31,1	0,85
ТВВ-320-2ЕУ3	375	20	1,698	0,258	30	0,85
ТВВ-500-2У3	588	20	2,413	0,373	33	0,85

Таблиця Д2 - Параметри трансформаторів

Тип трансформатора	S_n , МВА	U_{HH} , кВ	U_{HB} , кВ	U_k , %
ТД-40000/110	40	6,3; 10,5	121	11
ТДЦ-80000/110	80	6,3; 10,5	121	11
ТДЦ-125000/110	125	10,5	121	10,5
ТДЦ-125000/330	125	10,5; 13,8	347	11
ТДЦ-200000/220	200	13,8; 15,75; 18	242	11
ТДЦ-250000/220	250	13,8; 15,75	242	11
ТДЦ-250000/330	250	13,8; 15,75	347	11
ТДЦ-400000/220	400	13,8; 15,75; 20	242	10,5
ТЦ-400000/330	400	15,75; 20	347	11
ТНЦ-630000/330	630	15,75; 20; 24	347	11

Таблиця Д3 - Параметри автотрансформаторів

Тип автотрансформатора	S_n , МВА	U_{HC} , кВ	U_{HB} , кВ	U_{HH} , кВ	U_k , %		
					U_{BC}	U_{BH}	U_{CH}
АТДЦТН-63000/220/110	63	121	230	10,5	11	35	22
АТДЦТН-125000/330/110	125	115	330	10,5	10	35	24
АТДЦТН-125000/220/110	125	121	230	10,5	11	35	22
АОДЦТН-133000/330/220	133	$\frac{230}{\sqrt{3}}$	$\frac{330}{\sqrt{3}}$	10,5	9	60	48
АОДЦТН-167000/500/330	167	$\frac{330}{\sqrt{3}}$	$\frac{500}{\sqrt{3}}$	10,5	9,5	67	61
АТДЦТН-200000/330/110	200	115	330	10,5	10,5	38	25
АОДЦТН-417000/750/330	417	$\frac{330}{\sqrt{3}}$	$\frac{750}{\sqrt{3}}$	10,5	10	28	17

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ
з курсу

«ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ»

*(для студентів 3,4 курсів денної і 4 курсу заочної форм навчання
за напрямом підготовки 6.050701– "Електротехніка та електротехнології",
а також для слухачів другої вищої освіти
за спеціальністю "Електротехнічні системи електроспоживання")*

Укладачі: **ПІСКУРЬОВ** Михайло Федорович

ШВЕЦЬ Сергій Вікторович

Відповідний за випуск: *В.А. Маляренко*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *Н. В. Зражевська*

План 2012, поз. 292М

Підп. до друку 18.02.2013

Друк на ризографі

Тираж 50 пр.

Формат 60x84 1/16

Ум.-друк арк. 2,0

Зам. № _____

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК №4064 від 12.05.2011р.